



Munich Personal RePEc Archive

**Wpływ optymalizacji kopalń
odkrywkowych na rozwiązanie modelu
bilateralnego monopolu: kopalnia
elektrownia w długim okresie**

Jurdziak, Leszek

23 October 2006

Online at <https://mpra.ub.uni-muenchen.de/531/>

MPRA Paper No. 531, posted 23 Oct 2006 UTC

**WPLYW OPTYMALIZACJI KOPALŃ ODKRYWKOWYCH
NA ROZWIĄZANIE MODELU BILATERALNEGO MONOPOLU:
KOPALNIA & ELEKTROWNIA W DŁUGIM OKRESIE**

**THE INFLUENCE OF LIGNITE OPENCAST MINE
OPTIMISATION ON SOLUTION OF BILATERAL MONOPOLY
MODEL OF LIGNITE MINE & POWER PLANT IN LONG RUN**

Leszek Jurdziak - Instytut Górnictwa, Politechnika Wrocławska,
leszek.jurdziak@pwr.wroc.pl

W pracy przedstawiono klasyczne i zmodyfikowane rozwiązanie bilateralnego monopolu dla układy kopalni węgla brunatnego i elektrownia korzystając zarówno z metod graficznych jak i analitycznych. Określony w wyniku optymalizacji kopalń odkrywkowych oraz procesu parametryzacji wpływ przyszłej ceny węgla na podaż kopalni w długi okresie oraz na zmienności parametrów zagnieżdżonych wyrobisk (m.in. stosunek nadkładu do węgla) oraz na jakość zawartego w nich węgla (wartość opałową, zawartość siarki i popiołu) wykorzystano do znalezienia optymalnego rozwiązania dla bilateralnego monopolu: kopalnia & elektrownia. Wykazano, że w przeciwieństwie do rozwiązania klasycznego rozwiązanie zmodyfikowane jest zdeterminowane nie tylko w zakresie ilości produktu pośredniego (węgla), lecz również jego ceny. Zaprezentowano i omówiono hipotetyczne rozwiązanie dla wyrobiska zlokalizowanego na złożu „Szczerców”.

In paper the classical and modified solution of bilateral monopoly for the system opencast mine and power plant has been presented both using graphical and analytical methods. Determined through pit optimization and parameterization the influence of lignite base price on lignite supply in long run and on volatility of nested pits' parameters (e.g. overburden to coal ratio) and quality of lignite contained in them (calorific value, sulphur and ash content) has been used to find optimal solution for bilateral monopoly: mine & power plant. It was shown that in contrary to the classical solution the modified one is determined not only in area of quantity of intermediate product (lignite) but also in its price. The hypothetical solution for the pit placed on the “Szczerców” deposit has been shown and discussed.

Liberalizacja rynku energii elektrycznej na świecie i w Unii Europejskiej oraz plany prywatyzacji sektora energetycznego prowadzą do znacznych zmian w jego strukturze. Jeszcze kilka lat temu próby połączenia kopalni i elektrowni w jeden organizm skończyły się fiaskiem, a obecnie utworzony został holding BOT Górnictwo i Energetyka składający się z dwóch par: kopalnia węgla brunatnego i elektrownia (Bełchatów i Turów) oraz elektrowni na węgiel kamienny (Opole). Zmiany są tak szybkie i rozległe, że modele ekonomiczne funkcjonowania zliberalizowanego rynku energii oraz tworzących się organizmów gospodarczych tworzone są równoległe z ich powstawaniem, a często zdarza się, że decyzje organizacyjno-administracyjne, czy zmiany własnościowe je wyprzedzają. Nie dotyczy to wyłącznie rynku polskiego, gdyż w innych krajach również zmiany następują bardzo szybko. UE idąc za przykładem USA chce zliberalizować rynek energetyczny by obniżone koszty energii pobudziły całą gospodarkę do rozwoju. Z drugiej strony nie chce popełnić błędów na tej drodze i uniknąć „wpadek”, jakie miały miejsce w USA i na świecie¹. Warto, więc i w Polsce poświęcić środki na

¹ Pojawienie się katastrofalnych awarii systemowych (blackoutów) z efektem domina, niedopasowania podaży energii na rynkach do popytu oraz niewydolność sieci energetycznych.

badanie rynku energetycznego, analizę jego funkcjonowania oraz prognozowanie i optymalizację działania podmiotów w nim uczestniczących w tym dopasowanie strategii rozwoju kopalń do potrzeb producentów energii i wymogów rynku energetycznego. Na Politechnice Wrocławskiej w Instytucie Górnictwa Politechniki Wrocławskiej opracowany i rozwijany jest model kopalni i elektrowni jako bilateralnego monopolu [7, 11, 13, 14]. Prowadzi się też prace nad wykorzystaniem metod optymalizacji w projektowaniu i eksploatacji kopalń odkrywkowych węgla brunatnego oraz aktywnym sterowaniem jakością strugi urobku [8, 9, 10, 12, 18, 19, 25].

Zalety zlokalizowania elektrowni tuż przy wylocie z kopalni (mine-mouth power plant) znane są od dawna. Rozwiązania tego typu były szczególnie popularne w latach 60-tych i 70-tych. Zwracano wtedy uwagę na korzyści wynikające z niskich kosztów transportu oraz pewności dostaw. Obecnie udział węgla z pobliskiej kopalni w elektrowniach tego typu zmniejszył się z 78% do 22% [6]. Jest to konsekwencja wyczerpywania się blisko położonych zasobów i wzrostu kosztów wydobywania, szukania węgla o wyższej jakości z uwagi na zaostrzone przepisy ochrony środowiska oraz liberalizacji rynku energetycznego – ucieczki elektrowni od „klinczowego” układu z kopalnią – skazania na jedynego dostawcę. Pomimo tych niedogodności w zaleceniach Banku Światowego dla chińskiego górnictwa węglowego dwie naczelne z 15 kluczowych strategii ochrony środowiska w sektorze energetyki dotyczą właśnie budowa dużych, efektywnych elektrowni typu „mine-mouth” [20]. O ile dla kopalń węgla kamiennego układ z pobliską elektrownią może być rozwiązany, to dla kopalń węgla brunatnego jest to praktycznie niemożliwe – obie strony rzeczywiście są na siebie skazane. Pomimo popularności tego układu w energetyce opartej na węglu kamiennym i jego powszechności w energetyce korzystającej z węgla brunatnego autor nigdzie nie natknął się w literaturze światowej by układ kopalnia-elektrownia analizowano jako bilateralny monopol, choć wprost idealnie się do tego nadaje. Spełnia bowiem wszystkie kryteria zawarte jego definicji². Znacznie bardziej niż sytuacja pomiędzy związkiem zawodowym, a jedynym pracodawcą najczęściej przytaczana w podręcznikach ekonomii i literaturze specjalistycznej jako realny przykład. Wskazana w pracy [13] konieczność zastosowania metod optymalizacji wynika ze specyfiki kopalni i powinna mieć istotny wpływ na rozwiązanie.

Klasyczne rozwiązanie dla bilateralnego monopolu

Pierwsze rozwiązanie dla bilateralnego monopolu opublikowane zostało już w 1928 r [4]. Nie oznacza to, że jest powszechnie znane i prawidłowo stosowane. W pracy [3] zwrócono uwagę, że prawie 80% podręczników ekonomii w USA do roku 1987 prezentowała błędne, niejasne lub niekompletne rozwiązania. Nawet w słowniku ekonomii [1] podano, że w sytuacji bilateralnego monopolu „teoretyczne wyznaczenie ilości i ceny będzie nieokreślone oraz będzie efektem współzależności obu stron”. Od tego czasu ukazało się sporo publikacji poświęconych analizie różnych przykładów i aspektów funkcjonowania tego układu. Żadna z nich, spośród znanych autorowi, nie odnosiła się jednak do

² *Bilateralny monopol* (czasami nazywany również monopolem dwustronnym) jest rynkiem, na którym pojedynczy sprzedawca (monopol) styka się z pojedynczym kupującym (monopsomem) [1].

tandemu kopalnia-elektrownia. Jako przykład bilateralnego monopolu związanego z górnictwem podawano handel węglem pomiędzy Australią, a Japonią. W pracy [21] omawiano bilateralny monopol na przykładzie kopalń rudy żelaza i hut stali jednak bardziej w kontekście całych branż niż poszczególnych firm, gdyż zarówno kopalnia rudy może sprzedać surowiec innej hucie jak i huta może kupić rudę z innego źródła. Dopiero w pracy [13] zwrócono uwagę na adekwatność i przydatność modelu bilateralnego-monopolu do opisu funkcjonowania układu: kopalnia-elektrownia. Klasyczne rozwiązanie dla tego układu zaprezentowano w [11]. Tu zostanie ono przedstawione nie tylko w postaci graficznej dla liniowych funkcji popytu, lecz również analitycznej dla dowolnych nieliniowych zależności.

Rozwiązanie graficzne

Klasyczne rozwiązanie dla bilateralnego monopolu zostało zaadoptowane dla układu kopalnia – elektrownia w pracy [11]. Za monopolistę dostarczającego pośredni produkt dla monopsonisty przyjęto kopalnię węgla brunatnego dostarczającą węgiel brunatny dla elektrowni. Elektrownia z racji liberalizacji rynku potraktowano jako firmę konkurującą na wolnym rynku i stykającą się z odwrotnie nachylnym popytem na energię elektryczną będącą finalnym produktem bilateralnego monopolu. Oznacza to, że chcąc sprzedać więcej energii elektrownia musi cenę obniżyć.

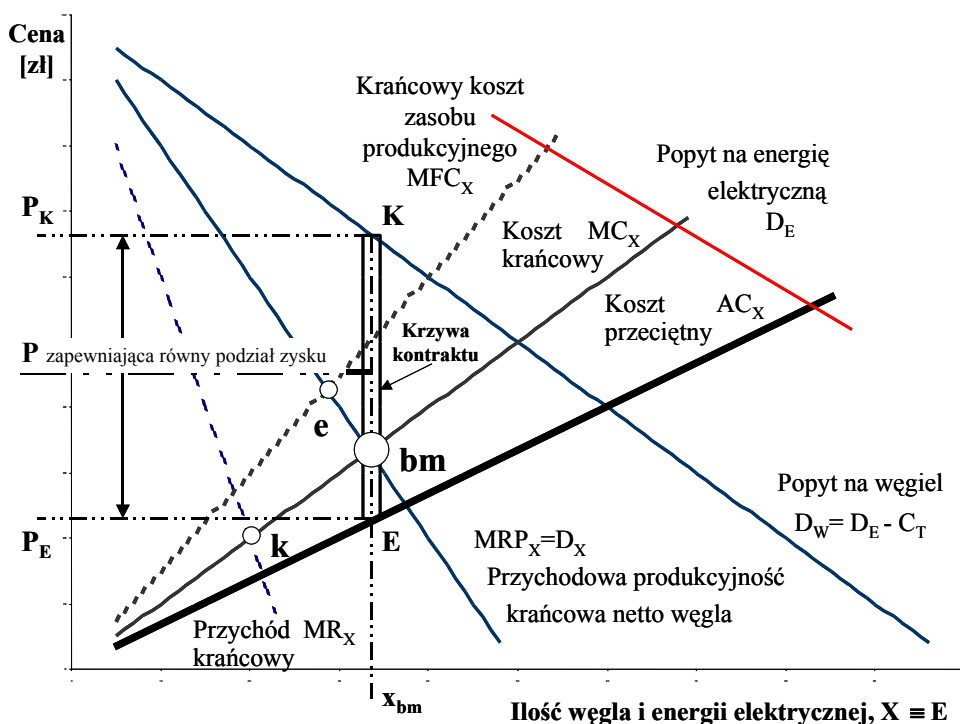
Z uwagi na to, że na rynku energii elektrownia będzie musiała zachowywać się konkurencyjnie *popyt na węgiel brunatny* D_W , jako popyt pochodny popytu na energię elektryczną D_E (rys.1), będzie stanowił różnicę $D_E - C_T$, gdzie C_T jest stałym kosztem transformacji 1 jednostki węgla brunatnego na 1 jednostkę energii elektrycznej ($E/X=1$, $E \equiv X$). Jest to założenie upraszczające, ale nie krytyczne dla analizy i ma jedynie ją ułatwić. Faktyczny stosunek jednostki węgla do jednostki energii nie musi być stały i wynosić 1. Przy rozwiązaniu analitycznym będzie przyjęte, że $e=e(x)$. Koszt C_T najprawdopodobniej zależy od jakości węgla i poziomu wielkości produkcji. W pewnym przedziale jej wielkości można jednak uznać, że koszt ten jest stały. Krzywa $D_W = D_E - C_T$ będzie wtedy przedstawiać *przeciętny przychód netto* elektrowni jako funkcję zaangażowanej ilości węgla x .

Gdyby elektrownia była cenotwórcą na rynku energii (monopolem) to pochodnym popytem na energię byłaby krzywa krańcowa dla krzywej $D_E - C_T$ oznaczona na rysunku przez D_X . Krzywa D_X reprezentuje również *przychodową produkcyjność krańcową netto dla zasobu X*. Przez **przychodową produkcyjność krańcową netto węgla** (MRP_X) należy rozumieć dodatkowy przychód netto elektrowni wygenerowany przez zaangażowanie dodatkowej jednostki węgla przy jego zużyciu na poziomie x , przy założeniu, że pozostałe zasoby niezbędne do transformacji węgla w energię są optymalnie dostosowane.

Krzywa oznaczona MR_X jest krzywą krańcową dla D_X i reprezentuje *przychód krańcowy* związany ze sprzedażą węgla do elektrowni, która ma siłę monopolu na rynku energii (E), ale nie ma siły monopsonu na rynku zasobów X . Należy jednak zauważyć, że D_X nie może stanowić pochodnego popytu elektrowni na węgiel w bilateralnym monopolu, gdyż monopsonista nie jest cenobiorcą i nie posiada krzywej popytu.

Na rys.1 przedstawione są również krzywe kosztowe. AC_X oznacza *przeciętny koszt produkcji x jednostek węgla w kopalni*, a MC_X jest odpowiednim *kosztem krańcowym*. Gdyby kopalnia działała jak idealny konkurent to krzywa MC_X stanowiłaby jej *krzywą podaży*. Wtedy też, gdyby elektrownia, będąc monopsonistą, kupowała węgiel od takiego konkurenta, krzywa MFC_X stanowiłaby *krańcowy koszt zasobu produkcyjnego* (Marginal Factor Cost of input).

Łączne zyski kopalni i elektrowni będą zmaksymalizowane w punkcie przecięcia przychodowej produktywności krańcowej MRP_X z kosztem krańcowym MC_X (punkt **bm** na rys.3). Odpowiada to wielkości produkcji węgla x_{bm} i **tylko dla tej wielkości produkcji łączne zyski kopalni i elektrowni będą maksymalne, przy danym popycie D_E na energię elektryczną**. W pracy [3] wykazano, że do konieczności maksymalizacji łącznych zysków dochodzi się niezależnie od tego, czy bilateralny monopol działa jako zintegrowana pionowo firma (o dwóch odrębnych etapach produkcji), czy też dwa odrębne podmioty gospodarcze kierujące się maksymalizacją własnych zysków.



Rys.1 Graficzne rozwiązanie dla bilateralnego monopolu kopalnia & elektrownia maksymalizujące łączne zyski układu przy zużyciu x_{bm} węgla brunatnego [11].

Pionowa linia pomiędzy punktami E i K reprezentuje *krzywą kontraktu*, czyli zbiór wszystkich punktów (układów cen i wielkości produkcji), poza którymi nie można uzyskać wzajemnie korzystnej wymiany [5]. Inaczej mówiąc reprezentuje ona zbiór tych punktów styczności rodzin *krzywych indyferencji* (o identycznej użyteczności dla uczestników negocjacji) z obu stron zapewniających im użyteczność, co najmniej na poziomie punktu odpowiadającego brakowi jakiegokolwiek wymiany [23]. Krzywa kontraktu dla bilateralnego

monopolu jest pionowa i ograniczona jest cenami węgla P_E i P_K . Przy cenie P_E zmaksymalizowane zyski przejmuje w całości elektrownia (kupujący), a przy cenie P_K wszystkie zyski przechodzą dla kopalni (sprzedającego). Każda cena z przedziału $[P_E, P_K]$ reprezentuje mniej lub bardziej akceptowalny kompromis i **determinuje podział łącznych zysków pomiędzy uczestników bilateralnego monopolu – odzwierciedla w ten sposób siłę przetargową uczestników negocjacji.**

Cena produktu pośredniego (węgla) nie ma wpływu na wybór wielkości produkcji, którą ustala się na podstawie znajomości krzywej kosztu krańcowego produkcji węgla MC_X (dane znane kopalni) i krzywej produktywności krańcowej węgla MRP_X (dane znane elektrowni). Chcąc wyznaczyć optymalną dla obu stron wielkość dostaw węgla konieczne jest, więc wzajemna współpraca i zaufanie wymagające ujawnienie swoich danych kosztowych. Bez wzajemnego współdziałania i uczciwości obu stronom grozi podjęcie nieoptymalnych decyzji, a więc mniejsze zyski lub nawet straty. Z tego też względu podjęcie optymalnych decyzji w warunkach integracji pionowej (wspólnota celów i pełna jawność danych o kosztach) jest bardziej prawdopodobne.

W pracy [2] zaproponowano alternatywne rozwiązanie dla integracji pionowej w przypadku braku zgody obu stron na takie działanie. Korzystają one z kontraktów pomiędzy obu stronami opartych na formułach cenowych uwzględniających z góry zadany podział zysków. Przedmiotem negocjacji jest wtedy nie sama cena, lecz parametr decydujący o podziale zysków. Raz zaakceptowany podział zysków może być mechanicznie korygowany po każdorazowej zmianie istotnych kosztów w kopalni i elektrowni. Ujawnienie własnych kosztów i wzajemna ich kontrola są niezbędne by kontrakty cenowe mogły funkcjonować prawidłowo wskazując optymalną wielkość produkcji i dbając by zaakceptowany podział zysków został utrzymany.

Rozwiązanie analityczne

Rozwiązanie analityczne przytoczone jest za [14]. Niech $\Pi_E(p, x)$ oznacza zysk elektrowni, a $\Pi_K(p, x)$ zysk kopalni w funkcji ilości x i ceny p węgla brunatnego.

$$\Pi_E(p, x) = p_e e(x) - px - c_E(x) \quad (1)$$

$$\Pi_K(p, x) = px - c_K(x) \quad (2)$$

Całkowity, niezdyskontowany przychód elektrowni w okresie całego jej życia wyniesie $p_e e(x)$, gdzie p_e jest średnią ceną energii elektrycznej w tym okresie, a $e(x)$ ilością energii wyprodukowanej z x jednostek węgla brunatnego dostarczonego z kopalni. W rozwiązaniu graficznym założono, że ilość energii $e \equiv x$. Tu ograniczenie to nie jest już potrzebne. Funkcja $e(x)$ może być dowolną funkcją przekształcającą ilość węgla w wynikową ilość energii elektrycznej $e(x)$. W pracy [24] przyjęto szacunek, że z 1GJ energii cieplnej zawartej w węglu po uwzględnieniu sprawności wytwarzania netto w elektrowni i sprawności przesyłu do odbiorców dociera ok. 0.075 MWh. Funkcję $e(x)$ można, zatem oszacować jako liniową funkcję ilości ciepła zawartego w węglu, a więc również samej ilości węgla x .

Przychód elektrowni $p_e e(x)$ jest pomniejszony o koszt związany z zakupem węgla px oraz własne koszty całkowite (stałe i zmienne) wybudowania, eksploatacji i likwidacji elektrowni w całym okresie jej życia $c_E(x)$, ale bez kosztów zakupu węgla, gdyż zostały uwzględnione jako osobna pozycja.

Zysk kopalni to całkowity przychód px ze sprzedaży ilości węgla x po średniej cenie p w okresie jej życia pomniejszony o całkowite koszty kopalni $c_K(x)$ obejmujące koszty stałe i zmienne założenia kopalni, jej eksploatacji i likwidacji (łącznie z kosztami rekultywacji terenów poeksploatacyjnych).

Gdy bilateralny monopol jest zorganizowany jako pionowo zintegrowana firma energetyczna to jej całkowity zysk $\Pi_V(x)$ jest dany wzorem (3) i nie jest zależny od ceny węgla (produktu pośredniego) p .

$$\Pi_V(x) = \Pi_E + \Pi_K = p_e e(x) - c_K(x) - c_E(x) \quad (3)$$

Na podstawie formuły (3) można wyznaczyć optymalną ilość węgla x_{bm} maksymalizującą wartość łącznego zysku. Ilość węgla x_{bm} jest zdeterminowana, gdyż stanowi rozwiązanie równania:

$$p_e e'(x) = c'_E(x) + c'_K(x) \quad (4)$$

W pracy [3] pokazano, że optymalnym rozwiązaniem zarówno dla bilateralnego monopolu jak i pionowo zintegrowanej firmy jest produkcja tej samej ilości produktu pośredniego (wydobycie, sprzedanie i przetworzenie tej samej ilości węgla). Rozwiązanie równania 4 definiuje efektywną w sensie Pareto³, krzywą kontraktu pomiędzy punktami E i K (rys.1). Punkty E i K, na granicy krzywej kontraktu wyznaczają graniczne poziomy ceny węgla akceptowalne przez obie strony. W punkcie E całość zysku przejmuje elektrownia, a kopalnia osiąga zaledwie próg rentowności (zyski pokrywają koszty). W punkcie K sytuacja jest odwrócona. Tym razem kopalnia przejmuje wszystkie zyski, a elektrownia pokrywa jedynie swoje koszty. Punktom E i K odpowiadają ceny węgla brunatnego (5).

$$p_E = \frac{c_K(x_{bm})}{x_{bm}}, p_K = \frac{p_e e(x_{bm}) - c_E(x_{bm})}{x_{bm}} \quad (5)$$

Konieczność modyfikacji klasycznego rozwiązania

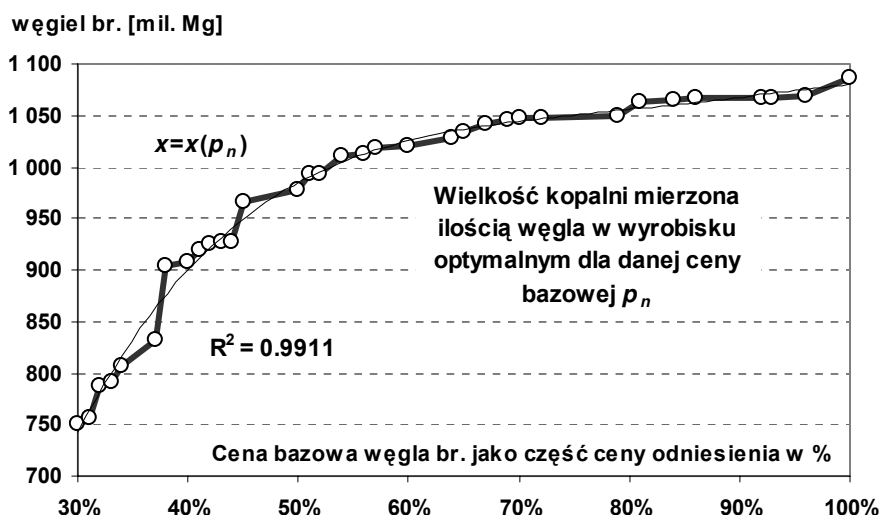
Rozwiązanie klasyczne nie uwzględnia specyfiki kopalni węgla brunatnego jako sprzedawcy w bilateralnym monopolu. Zwrócono już na to uwagę w pracy [13] proponującej zastosowanie tego modelu wraz z wykorzystaniem metod optymalizacji kopalń odkrywkowych do analizy układu kopalnia & elektrownia. Stwierdzono tam, że model bilateralnego monopolu: elektrownia – kopalnia węgla brunatnego działającego na rynku energetycznym w Polsce powinien uwzględniać wpływ ceny bazowej węgla brunatnego oraz jakości węgla na łączne zyski tego układu i ich podział przy traktowaniu elektrowni i kopalni zarówno jako

³ *Efektywność w sensie Pareto* oznacza, że nie można poprawić sytuacji jednej ze stron nie pogarszając sytuacji drugiej.

wspólnego, zintegrowanego pionowo organizmu jak i dwóch odrębnych podmiotów.

W rozwiązaniu klasycznym przedstawionym powyżej założono, że cena półproduktu nie ma wpływu na wielkość łącznego zysku. W przypadku kopalni tak nie jest. Cena surowca decyduje, bowiem o tym, co jest, a co nie jest opłacalne do wydobycia. Zasoby przemysłowe, przeznaczone do wydobycia w obrębie zasobów bilansowych wyznacza się, bowiem w oparciu o kryteria ekonomiczne [27]. W przypadku węgla oznacza to, że im wyższa jest jego cena tym głębiej opłaca się po niego sięgać (zwiększać stosunek nakładu do węgla) i tym uboższe partie złoża opłaca się wydobyć. Oczywiście do eksploatacji przeznaczone będą jedynie partie złoża nadające się do wykorzystania przez elektrownie bezpośrednio lub po zmieszaniu z węglem o „lepszych” parametrach jakościowych. Kryteria technologiczno-ekologiczne obejmujące zarówno wymogi kotłów w elektrowni, co do granicznych wartości parametrów jakościowych jak i technologiczne ograniczenia kopalni (nachylenie skarp, obszary w filarach ochronnych itp.) są bowiem nadrzędne.

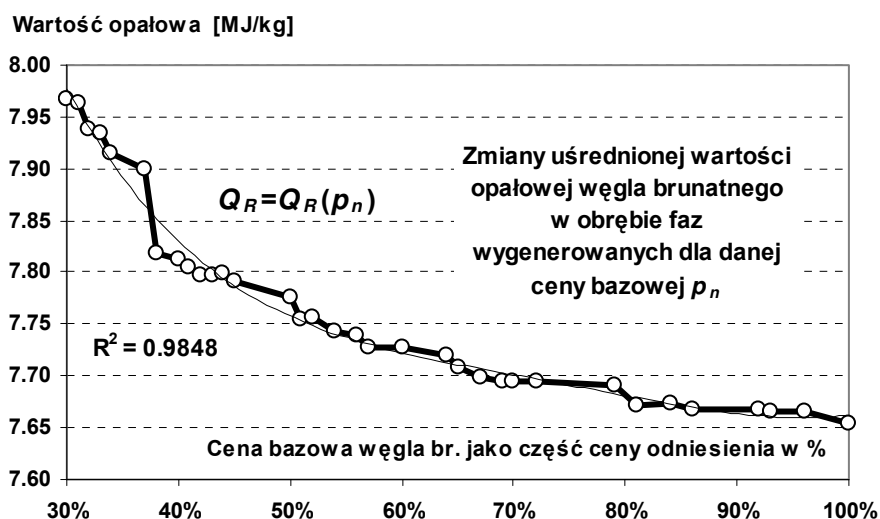
Najlepszym sposobem wyznaczenia w przestrzeni trójwymiarowej optymalnej do wydobycia ilości węgla, czyli określenia kształtu i wielkości docelowego wyrobiska kopalni odkrywkowej jest zastosowanie jednego z dostępnych na rynku algorytmów optymalizacyjnych [10, 12] korzystających z wartościowego modelu złoża [17]. Najpowszechniej stosowanym w zakresie metod prowadzących analizę bez dyskontowania przepływów pieniężnych jest algorytm Lerch'sa-Grossmann'a [25]. Wykorzystywany jest on m.in. w programie Whittle 3D, 4D i 4X oraz w programie MaxiPit i rodzinie programów NPVScheduler firmy Earthworks Corp. z Australii należącej do grupy DATAMINE.



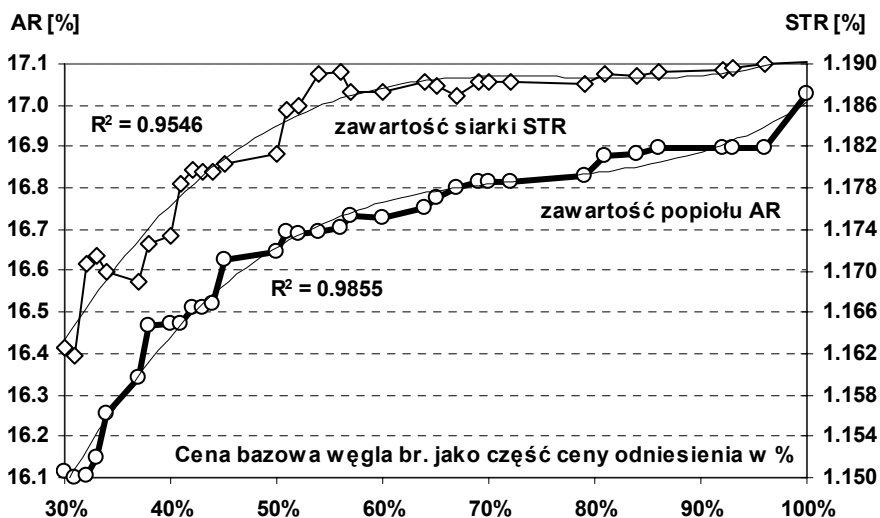
Rys.2 Podaż węgla z kopalni dla elektrowni w długim okresie – ilość węgla w poszczególnych fazach wyznaczonych różnym poziomem ceny bazowej p_n [7].

Proces parametryzacji pozwala wygenerować serię optymalnych wyrobisk docelowych (faz, wyrobisk zagnieżdżonych) dla poszczególnych poziomów ceny

surowca. Dzięki temu można uzyskać swoistą krzywą podaży węgla z kopalni w długim okresie tzn. takim przedziale czasu, w którym można swobodnie dobierać wielkość przedsiębiorstwa by uzyskać optymalny wynik ekonomiczny. Przykładową długookresową krzywą podaży węgla z kopalni do elektrowni sporządzoną na bazie procesu parametryzacji przeprowadzonego dla studialnego modelu złoża „Szczerców” przedstawiono na rys. 2 [7].



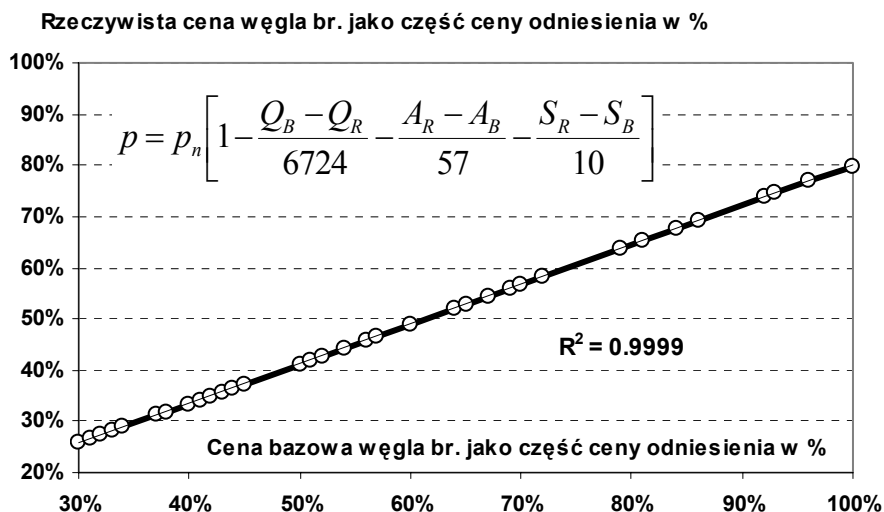
Rys.3 Pośredni wpływ wzrostu ceny bazowej p_n na obniżenie średniej wartości opałowej węgla w kolejnych zagnieżdżonych wyrobiskach docelowych (fazach). [7,14].



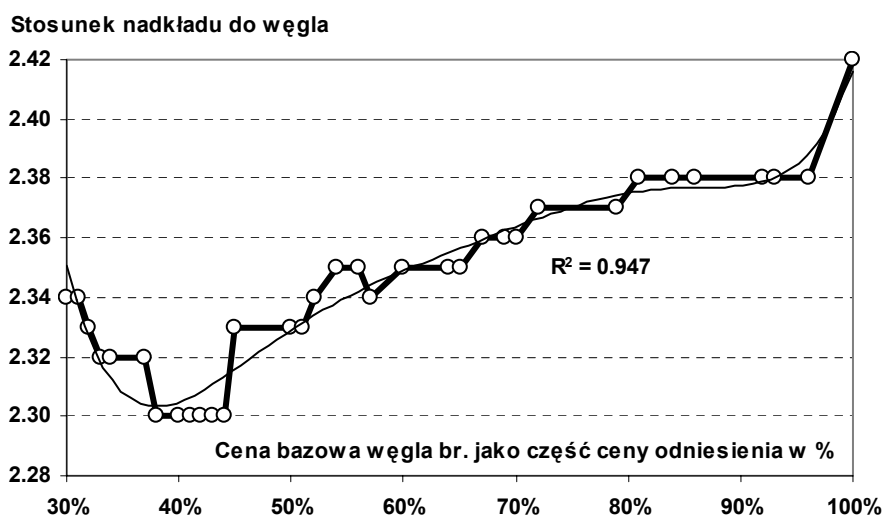
Rys.4 Pośredni wpływ wzrostu ceny bazowej p_n na wzrost średniej zawartości siarki i popiołu w węglu w kolejnych zagnieżdżonych wyrobiskach docelowych (fazach) [7].

Cena węgla p_n ma również wpływ na inne parametry kopalni istotnie wpływające na przychody oraz koszty kopalni i elektrowni. W pracy [7] zbadano wpływ wzrostu ceny bazowej węgla brunatnego nie tylko na zmianę wielkości wyrobiska docelowego, lecz również na obniżenie jakości uśrednionego węgla

objawiającego się m.in. spadkiem wartości opałowej (rys.3) oraz wzrostem zawartości siarki i popiołu (rys.4).



Rys.5 Zmiany rzeczywistej ceny za węgiel płaconej kopalni przez elektrownię jako konsekwencja obniżenia jakości uśrednionego węgla w kolejnych fazach. Rzeczywista cena węgla jest iloczynem ceny bazowej p_n i czynnika zależnego od jego jakości.



Rys.6 Zmiany stosunku ilości nakładu do węgla w kolejnych fazach jako funkcja ceny bazowej p_n [7,14].

Konsekwencją tych zmian jest względne obniżenie faktycznej ceny uśrednionego węgla płaconej kopalni przez elektrownię (rys.5). Do analiz wykorzystano wyrobisko docelowe uzyskane dzięki optymalizacji metodą Lerchs'a-Grossmann'a przeprowadzonej w programie NPVScheduler+ oraz szereg jego wariantów (faz), wygenerowanych dla różnych poziomów ceny bazowej węgla. Podstawą analiz był studialny model jakościowy złoża węgla brunatnego

„Szczerców”, który posłużył do opracowania modelu wartościowego poprzez zastosowanie formuły cenowej (rys.5) uwzględniającej jakość węgla [8, 14, 18].

Zarówno zmiany ilości jak i uśrednionej jakości węgla w obrębie faz mają, więc istotny, nieliniowy wpływ zarówno na przychody jak i koszty elektrowni i kopalni. Zmiany ilości i kaloryczności węgla warunkują, bowiem ilość energii, którą można uzyskać ze spalania tego węgla w kotłach elektrowni, a więc mają wpływ na jej przychód. Zmiana innych parametrów jakościowych takich, jak zapopielenie i zawartość siarki (rys.4) mają wpływ na koszty własne elektrowni związane z odsiarczaniem i odpylaniem oraz utylizacją odpadów. Zmiana ceny bazowej ma również wpływ na zmianę kształtu i wielkości kopalni, a więc na zmianę stosunku nakładu do węgla (rys.6). Wpływa, więc bezpośrednio na koszty kopalni związane ze zdejmowaniem i składowaniem nakładu oraz rekultywacją.

Wszystkie omówione wcześniej nieliniowe i nieciągłe zależności można z dużym przybliżeniem aproksymować wielomianami różnych stopni. Na rysunkach 2-6 przedstawiono wartości współczynników R^2 by zademonstrować jakość dopasowania. Uzyskane ciągłe aproksymacje rzeczywistych zależności z procesu parametryzacji mogą być wykorzystane do znalezienia analitycznego rozwiązania.

Inną modyfikacją, którą powinno się jeszcze uwzględnić jest wpływ ceny energii elektrycznej na opłacalność bilateralnego monopolu. W modelu możemy założyć, że elektrownia może sprzedać całą wyprodukowaną energię po stałej cenie rynkowej p_e lub będzie musiała cenę obniżyć, gdyby chciała sprzedać więcej energii. Z uwagi na fakt, że elektrownie zasilane węglem brunatnym w Polsce (zwłaszcza KWB Bełchatów, czy BOT) posiadają znaczące udziały w rynku to mogą one wpływać na cenę – być cenotwórcami. Z chwilą pełnego otwarcia rynku na konkurencję zagraniczną wpływ ten może zostać ograniczony.

W modelu bilateralnego monopolu konieczne jest, więc uwzględnienie wszystkich powyżej omówionych zależności by znaleźć optymalne rozwiązania maksymalizujące łączne zyski układu i określić podział zysków pomiędzy elektrownią, a kopalnię.

Analityczne rozwiązanie zmodyfikowanego modelu bilateralnego monopolu

Uwzględnienie wpływu ceny bazowej p_n , będącej przedmiotem negocjacji pomiędzy kopalnią a elektrownią, na wielkość i kształt optymalnego wyrobiska (wyznaczonego metodą Lerchsa-Grossmanna), a w konsekwencji na zmianę ilości i jakości węgla brunatnego pozwala przedstawić nowe formuły na obliczanie zysku kopalni i elektrowni.

Zysk elektrowni Π_E można po modyfikacjach przedstawić jako funkcję wyłącznie jednej zmiennej p_n – ceny węgla bazowego. Początkowo cena ta była ustalana na drodze administracyjnej, a obecnie w drodze negocjacji pomiędzy kopalnią, a elektrownią. Warto więc od niej uzależnić pozostałe zmienne.

$$\Pi_E(p_n) = p_e(e(p_n))e(x(p_n), Q_R(p_n)) - p(p_n)x(p_n) - c_E(x(p_n), A_R(p_n), S_R(p_n)) \quad (6)$$

Przychód elektrowni podobnie jak poprzednio można wyrazić jako iloczyn ceny energii p_e i jej ilości e . Przyszłą cenę energii można wyznaczyć z prognozowanego popytu na nią po określeniu ilości energii e jaką może dostarczyć elektrownia, $p_e = p_e(e)$. Ilość energii zależy z kolei od ilości węgla $x(p_n)$ i jego jakości (głównie wartości opałowej $Q_R(p_n)$):

$$e(p_n) = e(x(p_n), Q_R(p_n)) \quad (7)$$

Koszt zakupu węgla z kopalni zależy od jego ilości $x = x(p_n)$ (rys.2) oraz ceny, która również pośrednio zależy od ceny bazowej (rys.5). Przychód należy pomniejszyć o koszty własne elektrowni, które zależą głównie od ilości spalanego węgla $x(p_n)$ oraz ilości zanieczyszczeń (popiołu i siarki), które trzeba usunąć z gazów spalinowych oraz bezpiecznie zutylizować. Koszty c_E są więc funkcją tych 3 zmiennych, które pośrednio zależą od p_n :

$$c_E(p_n) = c_E(x(p_n), A_R(p_n), S_R(p_n)) \quad (8)$$

Zysk kopalni Π_K również można przedstawić jako funkcję ceny bazowej p_n . Stanowi on, bowiem różnicę jej przychodów i kosztów.

$$\Pi_K(p, x) = p(p_n)x(p_n) - c_K(x(p_n)) \quad (9)$$

Przychody kopalni to jeden ze składników kosztów elektrowni, który był już omówiony wcześniej. Koszty kopalni stanowią zaś funkcję ilości węgla i nakładu, a te określone są jednoznacznie w trakcie optymalizacji kopalni i procesu parametryzacji, które uzależniają je od ceny bazowej p_n (rys.2 i rys.5).

Łączny zysk układu kopalnia i elektrownia jest funkcją jednej zmiennej p_n .

$$\Pi_V(p_n) = p_e(x(p_n))e(x(p_n), Q_R(p_n)) - c_E(x(p_n), A_R(p_n), S_R(p_n)) - c_K(x(p_n)) \quad (10)$$

Dzięki formule (10) można znaleźć najlepszą cenę bazową węgla brunatnego p_{bm} , która maksymalizuje łączne zyski. Cena p_{bm} jest rozwiązaniem równania:

$$p'_e(p_n)e(p_n) + p_e(p_n)e'(p_n) = c'_E(p_n) + c'_K(p_n) \quad (11)$$

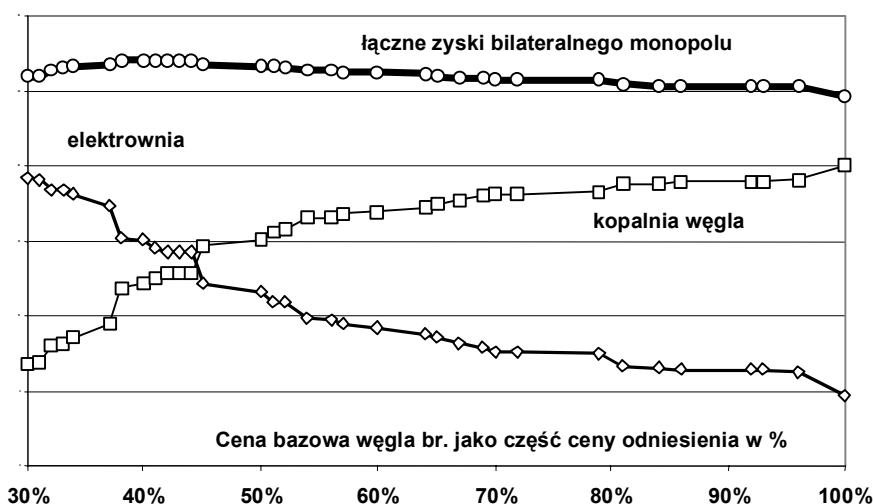
Z uwagi na ścisłe związanie ilości węgla x z ceną bazową p_n ($x = x(p_n)$, zobacz rys.2) zarówno p_n jak i ilość węgla x są zdeterminowane $x_{bm} = x(p_{bm})$. W zmodyfikowanym bilateralnym monopolu uwzględniającym specyfikę kopalni odkrywkowej (wyniki jej optymalizacji) nie ma, więc miejsca na negocjację ceny

bazowej. Jeśli zintegrowana firma energetyczna lub bilateralny monopol, chce osiągnąć maksymalne łączne zyski musi pogodzić się z wygenerowanym rozwiązaniem. Odstępstwa od optymalnej ceny bazowej, czy optymalnej ilości węgla będą prowadzić do mniejszych zysków.

Poglądowa prezentacja zmiany wielkości i podziału zysków bilateralnego monopolu dla różnych cen bazowych i wielkości kopalni

Wyznaczenie zysków kopalni, elektrowni i całego układu przeprowadzono dla danych wykorzystanych przy prowadzeniu optymalizacji i parametryzacji wyrobiska na polu „Szczerców”. Z uwagi na brak danych dotyczących kosztów elektrowni przyjęto hipotetycznie, że kształtują się na poziomie kosztów zakupu węgla, które stanowią wg [22] nawet do 60% kosztów wytworzenia energii. Wyniki obliczeń mają, więc jedynie walor poglądowy i służą wyłącznie do prezentacji możliwości uzyskania rozwiązania i potencjału informacyjnego do prowadzenia negocjacji i podejmowania strategicznych decyzji. W żadnym wypadku nie mogą służyć do wyciągnięcia jakichkolwiek wniosków, co do opłacalności układu przy różnych cenach bazowych i różnej wielkości kopalni. Właśnie z tego powodu na osi Y nie umieszczono żadnej skali liczbowej.

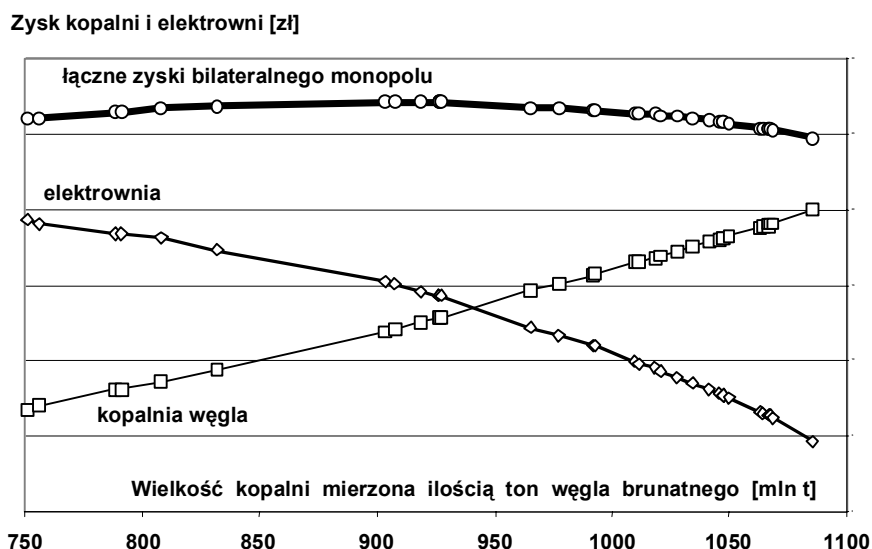
Zysk kopalni i elektrowni [zł]



Rys.7 Zmiany zysków kopalni i elektrowni oraz bilateralnego monopolu w funkcji zmiany poziomu ceny bazowej p_n , przy stałej cenie za energię wynoszącej 13 gr/kWh. Maksymalny łączny zysk zapewnia przyjęcie ceny bazowej p_n na poziomie 40% ceny odniesienia, co zapewnia elektrowni ok.55.5% udział w zysku.

Obliczenia przeprowadzono przy założeniu dwóch różnych zmian cen energii. W pierwszym przypadku założono stałą cenę energii na poziomie 13gr/kWh, niezależnie od wielkości kopalni (wielkości podaży energii z elektrowni). W drugim wypadku założono liniowe obniżenie ceny z 13 do 11gr/kWh przy wzroście wielkości kopalni z 750 milionów ton do 1.1 mld ton. Wyniki przedstawione są na rysunkach 7 i 8 oraz 9 i 10. Dzięki tego typu analizie można zaobserwować wpływ zmian cen energii na wyniki finansowe układu.

Przy przyjętych założeniach, co do ceny energii elektrycznej i kosztów, zyski bilateralnego monopolu są najwyższe dla ceny bazowej od 37% do 45% ceny odniesienia (rys.7). Odpowiada to wielkości kopalni 830-965mln ton węgla (rys.8). Podział zysków w tym obszarze jest prawie równy z niewielką przewagą elektrowni.



Rys.8 Zmiany zysków kopalni i elektrowni oraz bilateralnego monopolu w funkcji zmiany wielkości kopalni (mierzonej ilością węgla), przy stałej cenie za energię wynoszącej 13gr/kWh. Maksymalny łączny zysk zapewnia wyrobisko optymalne o wielkości ok. 907mln ton węgla, co zapewnia kopalni ok.45.5% udział w zysku [14].

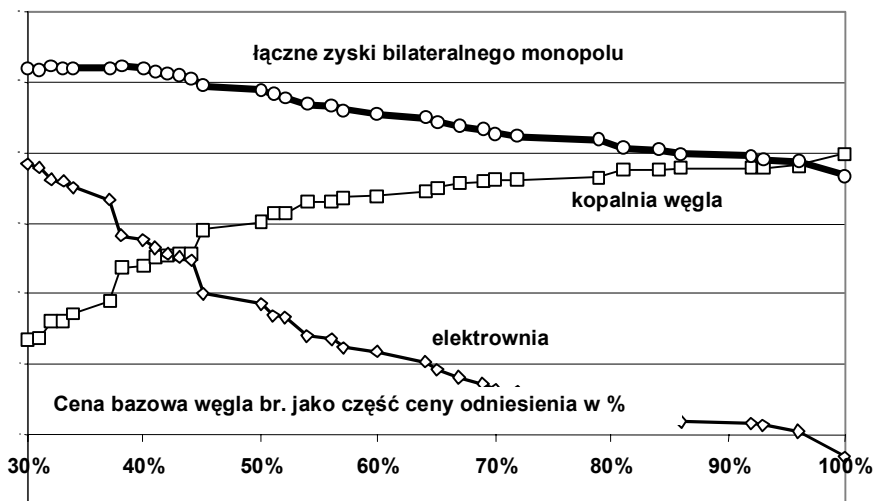
Jeśli założymy, że elektrownia chcąc podać na rynek więcej energii będzie musiała cenę obniżyć, np. z 13 gr/kWh do 11 gr/kWh, to sytuacja ulegnie zmianie. Maksymalne łączne, niezdyskontowane zyski nieco zmaleją (o ok. 3.5%), a wielkość optymalnej kopalni je zapewniającej zmniejszy się do 791 mln ton (lub 903 mln ton, przy minimalnie mniejszych zyskach, rys.9).

Cena bazowa węgla maksymalizująca łączne zyski będzie nieco niższa (32% ceny odniesienia, lub 38% odpowiednio), a udziały elektrowni w zyskach wzrosną do poziomu prawie 70% lub 54.3% dla drugiego lokalnego maksimum. Właśnie z uwagi na podział zysków kopalnia z pewnością wolałaby eksploatować większe wyrobisko, przy wyższej cenie bazowej węgla.

Z uwagi na stosunkowo stabilne zyski bilateralnego monopolu na maksymalnym poziomie w obszarze ceny bazowej 32%-38% ceny odniesienia, obszar ten można uznać za nową krzywą kontraktu i obszar negocjacji pomiędzy kopalnią i elektrownią. Jeśli układ kierowałby się również innymi kryteriami, poza maksymalnym zyskiem, przy wyborze strategii długofalowego działania np. maksymalizacją czasu pracy (by zapewnić miejsca pracy lokalnej społeczności) to uzyskane wyniki analizy również powinny stanowić podstawę przy podejmowaniu decyzji. Z wykresów łatwo można, bowiem zauważyć, jakimi stratami zysków okupione byłoby zwiększenie wielkości wyrobiska docelowego. Przy takim kryterium optymalne wyrobisko docelowe o wielkości 903 mln ton wygenerowane

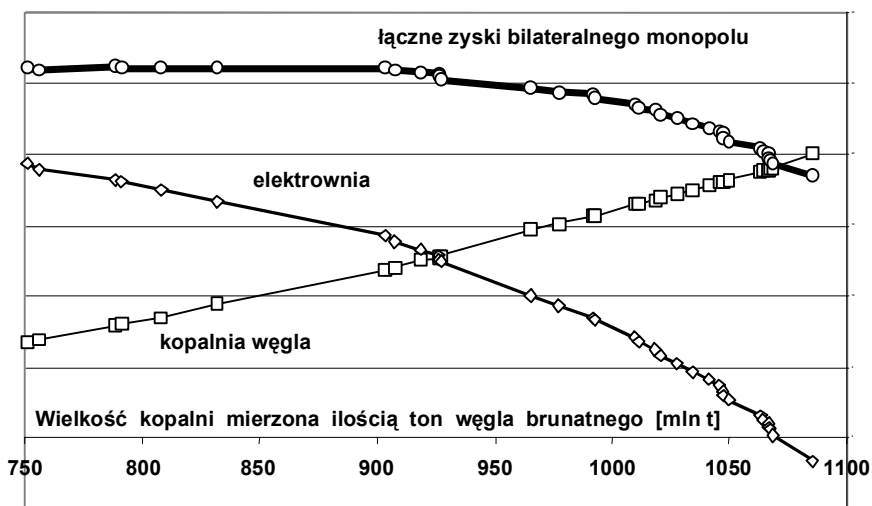
dla ceny bazowej p_n na poziomie 38% ceny odniesienia byłoby lepszym rozwiązaniem.

Zysk kopalni i elektrowni [zł]



Rys.9 Zmiany zysków kopalni i elektrowni oraz bilateralnego monopolu w funkcji zmiany poziomu ceny bazowej p_n , przy stałej cenie za energię zmniejszającej się z poziomu 13gr/kWh do 11 gr/kWh. Maksymalny łączny zysk zapewnia przyjęcie ceny bazowej p_n na poziomie 32% lub 38% ceny odniesienia (dwa lokalne maksima), co zapewnia elektrowni ok. 69.4% (lub 54.3%) udział w zysku [14].

Zysk kopalni i elektrowni [zł]



Rys.10 Zmiany zysków kopalni i elektrowni oraz bilateralnego monopolu w funkcji zmiany wielkości kopalni (mierzonej ilością węgla), przy cenie za energię zmniejszającej się z poziomu 13 gr/kWh (przy wydobywaniu 750 mln ton węgla) do 11 gr/kWh (przy wydobywaniu 1.1mld ton węgla). Maksymalny łączny zysk zapewnia wyrobisko optymalne o wielkości ok. 791mln ton węgla (lub 903 mln ton).

Należy jednak pamiętać, że rzeczywisty przebieg krzywej łącznych zysków bilateralnego monopolu może być zupełnie inny. Wyniki zaprezentowano, bowiem w oparciu o hipotetyczne koszty elektrowni oraz nieaktualne już dane o cenach węgla i kosztach kopalni. Do podjęcia racjonalnych decyzji konieczne jest ponowne przeprowadzenie pełnej procedury analizy począwszy od sporządzenia modelu wartościowego złoża na bazie wiarygodnego modelu jakościowego kopalni po przeprowadzenie optymalizacji i procesu parametryzacji (analizy wrażliwości kształtu i wielkości optymalnego wyrobiska na zmianę ceny bazowej) przy aktualnych cenach i kosztach w kopalni i elektrowni. Nie jest to wcale łatwe zadanie i wymaga ujawnienia szczegółowych danych o kosztach wydobycia i produkcji przez obie strony układu. Z tego względu w warunkach pionowej integracji lub połączeniu firm w jednym holdingu osiągnięcie wspólnego celu powinno być łatwiejsze.

Podsumowanie

Tandem odkrywkowa kopalnia węgla brunatnego i elektrownia w przeciwieństwie do klasycznego bilateralnego monopolu posiada zdeterminowane rozwiązanie nie tylko w zakresie ilości produktu pośredniego (węgla), lecz również jego ceny (rys.7-10).

Oznacza to, że i podział zysków pomiędzy kopalnię a elektrownię jest zdeterminowany i praktycznie nie ma miejsca na negocjacje chyba, że obszar wokół maksimum zysków jest stosunkowo płaski lub z uwagi na charakter zmian występuje kilka lokalnych maksimów na zbliżonym poziomie (rys.9 i 10).

Konieczne jest wzajemne zaufanie pomiędzy stronami bilateralnego monopolu, by można było wykorzystać wiarygodne dane o ich kosztach przy wyznaczaniu optymalnej ceny bazowej p_{bm} maksymalizującej łączne zyski układu. Z uwagi na wspólnotę interesów w zintegrowanym pionowo koncernie energetycznym prawdopodobieństwo osiągnięcia optymalnego rozwiązania jest wyższe.

Przeprowadzenie optymalizacji kopalni odkrywkowej i procesu parametryzacji, czyli analizy wrażliwości wielkości i kształtu wyrobiska docelowego na zmianę ceny bazowej węgla jest niezbędne, by określić wpływ tej ceny na długoterminową podaż węgla z kopalni do elektrowni, zmiany uśrednionych parametrów węgla oraz kosztów kopalni i elektrowni [7]. Jest to warunek konieczny do znalezienia optymalnego rozwiązania dla bilateralnego monopolu. Do jego wyznaczenia konieczne jest również uwzględnienie wpływu rynku energii poprzez wykorzystanie długoterminowych prognoz popytu na energię.

Prezentowane zależności dotyczące wyrobiska na złożu „Szczerców” mają jedynie poglądowy charakter i nie powinny stanowić podstawy do żadnych realnych decyzji. Racjonalne decyzje można podejmować dopiero po powtórzeniu całej procedury optymalizacyjnej z wykorzystaniem zweryfikowanego modelu złoża i powtórzeniu obliczeń dla aktualnych danych o cenach oraz kosztach w kopalni i elektrowni.

Potrzebne są dalsze prace nad modelem bilateralnego monopolu: kopalnia i elektrownia by znaleźć nie tylko optymalne rozwiązanie w długim okresie

zapewniające wskazanie wyrobiska docelowego maksymalizującego łączne, niezdyskontowane zyski układu, lecz również optymalną wielkość rocznego wydobycia/produkcji kopalni i elektrowni oraz optymalny harmonogram eksploatacji kopalni dla różnych horyzontów czasowych. W tym celu konieczne zastosowanie metod rachunku dyskontowego dla przepływów finansowych [16] oraz optymalnych harmonogramów rozwoju kopalni z wykorzystaniem homogenizacji (mieszania) urobku [26, 28]. Istnieją gotowe narzędzia i opracowano już procedury pozwalające na prognozowanie, a nawet optymalne sterowanie uśrednianiem jakości strugi urobku [19].

Przyszłe badania warto również wzbogacić o analizę ryzyka wynikającego ze spodziewanej dużej zmienności cen energii. Można tu wykorzystać techniki i metody zarządzania ryzykiem stosowane na rynkach innych surowców np. metali kolorowych [15] lub na rynkach stóp procentowych [29].

Proponowane rozwiązanie może być również zastosowane w przypadku innych bilateralnych monopolii w górnictwie takich jak: kopalnie surowców cementowo-wapiennych i cementownie, kopalnie rudy żelaza i huty, czy kopalnie kaolinu i zakłady produkcji porcelany.

Literatura

- [1] Bannock G., Baxter R.E., Davis E. *The Penguin Dictionary of Economics*. Penguin Books 1987.
- [2] Blair, R.D. & Kaserman, D.L. 1987. *A Note on Bilateral Monopoly and Formula Price Contracts*. The American Economic Review; June 77;3.
- [3] Blair, R.D., Kaserman, D.L. & Romano, R.E. 1989. *A Pedagogical Treatment of Bilateral Monopoly*. Southern Economic Journal 55, 831-841.
- [4] Bowley A., *Bilateral Monopoly*. Economic Journal, December 1928..
- [5] Friedman D.D., *Price Theory*. South-Western Publishing Co. 1986.
- [6] Heidrich K., *Mine-Mouth Power Plants: Conventional Coal Not Always a Simple Solution*. Coal Age, June 2003.
- [7] Jurdziak L., Kawalec W., *Analiza wrażliwości wielkości wyrobiska docelowego i jego parametrów na zmianę ceny bazowej węgla brunatnego*. Górnictwo i Geologia VI., Górnictwo i Geologia VII. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej Nr 106, Seria: Studia i Materiały: Nr 30, Wrocław 2004.
- [8] Jurdziak L., Kawalec W., *Optymalizacja rozwoju odkrywki w oparciu o cenę kopaliny i wymagania jakościowe na przykładzie złoża „Szczerców”*, VII Konferencja „Wykorzystanie Zasobów Złóż Kopalni Użytecznych”, Zakopane 2000 r.
- [9] Jurdziak L., Kawalec W., *Wykorzystanie lokalnie aktualizowanego modelu przestrzennego złoża dla szczegółowego sterowania jakością węgla brunatnego*, VII Konferencja „Wykorzystanie Zasobów Złóż Kopalni Użytecznych”, Zakopane 2000 r.
- [10] Jurdziak L., *Co należy wiedzieć projektując kopalnię? Sposób na trafne decyzje*. Gigawat Energia Nr 2/2004.
- [11] Jurdziak L., *Kopalnia odkrywkowa węgla brunatnego i elektrownia jako bilateralny monopol w klasycznym ujęciu*. Górnictwo i Geologia VII. Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej Nr 106, Seria: Studia i Materiały: Nr 30, Wrocław 2004.
- [12] Jurdziak L., *Na czym polega ekonomiczna optymalizacja kopalń odkrywkowych*, VII Krajowy Zjazd Górnictwa Odkrywkowego, Wrocław 2000 r.

- [13] Jurdziak L., *O potrzebie szczegółowego sterowania jakością węgla brunatnego na zliberalizowanym rynku energii – propozycja utworzenia modelu bilateralnego monopolu: kopalnia - elektrownia*, Górnictwo Odkrywkowe Nr 1 2004.
- [14] Jurdziak L., *Tandem: lignite opencast mine & power plant as a bilateral monopoly*. Mine Planning and Equipment Selection Wrocław 2004 (przyjęty do publikacji).
- [15] Jurdziak L., *Uwzględnienie ryzyka zmiany ceny surowców przy sporządzaniu optymalnego harmonogramu rozwoju kopalni i ocenie jej opłacalności*, Konferencja „Zarządzanie ryzykiem finansowym”, Wrocław 2000 r.
- [16] Jurdziak L., *Wartość bieżąca netto w projektowaniu kopalń odkrywkowych - możliwości programu MaxiPit i NPV Scheduler*. Materiały konferencyjne "Ekonomika, Organizacja i Zarządzanie w Górnictwie '99", Ustroń-Jaszowiec, 1999 r.
- [17] Jurdziak L., *Zasady tworzenia przestrzennych modeli rozkładu wartości złoża i kosztów eksploatacji na potrzeby programów optymalizacyjnych*. Górnictwo Odkrywkowe Nr 5-6, Wrocław 2000.
- [18] Kawalec W., Specylak J., *Open pit optimisation of a lignite deposit*. Mine Planning and Equipment Selection Ateny, Balkema 2000
- [19] Kawalec W., *Short-term scheduling and blending in lignite open-pit mine with BWEs*. Mine Planning and Equipment Selection Wrocław 2004 (przyjęty do publikacji).
- [20] Martinot E., *World bank energy projects in China: influences on environmental protection*. Energy Policy 29 (2001) 581-594.
- [21] Morgan J.N. *Bilateral Monopoly and the Competitive Output*. Quarterly Journal of Economics, August 1949.
- [22] Muras Z., *Zwolnienie z obowiązku zatwierdzania ceny węgla brunatnego*. Biuletyn URE 2/2002.
- [23] Owen G.: *Teoria gier*. PWN Warszawa 1975.
- [24] Sokolnicki S., Filipiak L., *Problematyka cen węgla brunatnego*. Węgiel Brunatny 3/1993.
- [25] Specylak J., Kawalec W., *Modelowanie geometrii odkrywki węgla brunatnego z zastosowaniem algorytmu optymalizacji Lerchs'a-Grossmann'a*, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, VI Konferencja Wykorzystanie zasobów złóż kopalin użytecznych, Zakopane 1998 r.
- [26] Tołwiński B., Golosinski T.S., *Long term open pit scheduler*, Mine Planning and Equipment Selection, Balkema, Rotterdam, 1995
- [27] Uberman R., Mazurek S., *Wyznaczenie zasobów przemysłowych węgla brunatnego w oparciu o kryteria ekonomiczne*. Węgiel Brunatny 1 (18) 1997.
- [28] Underwood R., Tołwiński B., *A mathematical programming viewpoint for solving the ultimate pit problem*, European Journal of Operational Research, 107, 1998
- [29] Weron R., *Energy price risk management*. Physica A 285 (2000) 127-134.

*Artykuł powstał w ramach pracy nad projektem badawczym Nr 0882/T12/2002/23
"Zintegrowana metoda optymalizacji kopalni odkrywkowej z systemem transportu
taśmowego"*